

文章编号:1004-7220(2014)02-0105-08

人工颈椎间盘置换术与融合术的生物力学比较

蒲婷^{1,2,4}, 吕聪伟^{2,4}, 颜滨³, 薛清华¹, 彭凡², 廖振华⁴, 刘伟强^{1,4}

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 深圳研究生院, 深圳 518055;

3. 深圳市第二人民医院, 深圳 518049; 4. 深圳清华大学研究院, 深圳 518057)

摘要: **目的** 分析颈前路植骨融合术(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)与颈椎间盘置换术(total disc replacement, TDR)后颈椎生物力学特性。**方法** 采用12具人体颈椎标本,通过三维非接触式光电测量系统及位移控制方式,测试原始状态(intact)、TDR及ACDF术后各节段在前屈与后伸、左侧弯与右侧弯、左旋转与右旋转6种独立工况的运动和载荷分布,并探讨颈椎正常生理运动规律及植入器械特点。**结果** TDR术后,颈椎各节段运动保留效果明显,能恢复接近正常的运动,并以屈伸、旋转工况为优;同等工况下ACDF术后手术节段运动丢失达73.41%,其他节段运动也存在明显改变。侧弯工况两者均存在较大运动改变,TDR达45.92%,ACDF达108.06%。试验发现,颈椎正常生理运动为空间三轴耦合运动,以侧弯工况耦合程度最大,绕X轴运动分量达35%,TDR术后,颈椎能恢复接近正常的耦合运动规律。**结论** TDR术能使颈椎恢复更接近正常的生理运动,在屈伸、旋转工况效果最好,侧弯次之。本研究为TDR与ACDF的临床手术提供理论依据和定量参考。

关键词: 颈椎间盘置换术; 颈前路植骨融合术; 力学特性; 活动度

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

In vitro study on biomechanical comparison between cervical arthroplasty and fusion

PU Ting^{1,2,4}, LÜ Cong-wei^{2,4}, YAN Bin³, XUE Qing-hua¹, PENG Fan², LIAO Zhen-hua⁴, LIU Wei-qiang^{1,4} (1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. Shenzhen Second People's Hospital, Shenzhen 518049, China; 4. Research Institute of Tsinghua University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Objective To analyze biomechanical properties of cervical spine after anterior cervical discectomy and fusion (ACDF) and total disc replacement (TDR) surgery. **Methods** Twelve cadaveric cervical spines (C2-T1) were adopted, and the motion and load distributions of the cervical segments under intact state and after ACDF and TDR surgery were tested using a three-dimensional (3D) optoelectronics measurement system. All the tests were carried out with displacement control in directions of flexion (Flex), extension (Ext), left bending (LB), right bending (RB), left rotation (LR) and right rotation (RR). Motion characteristics of the normal cervical spine and the implant were also discussed. **Results** In TDR-treated specimens, range of motion (ROM) was well preserved and could restore to the normal ROM distributions, especially in Flex/Ext and LR/RR direction. While in ACDF-treated specimens, ROM presented a large decrease as much as to 73.41% under the same condition compared with TDR, and ROM distributions were also changed obviously in other motions for the segments. Significant changes of ROM in LB/RB direction occurred in both TDR and ACDF group, which were up to

收稿日期:2013-01-09; 修回日期:2013-02-25

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAI18B05), 深圳市重点实验室提升发展计划(CXB201005260044A)。

通信作者:刘伟强, 教授, E-mail:weiqliu@hotmail.com。

45.92% and 108.06%, respectively. The experimental data indicated that the normal motion of cervical spines was a 3D coupled motion, especially in LB/RB direction, where a 35% rotation around X-axis existed. The cervical spine could recover close to normal coupled motion after TDR surgery. **Conclusions** TDR surgery can restore the physiological motion of cervical spines more close to the normal state, especially in Flex/Ext and LR/RR direction. The study provides a theoretical basis and quantitative reference for TDR and ACDF surgery in clinic.

Key words: Total disc replacement (TDR); Anterior cervical discectomy and fusion (ACDF); Mechanical properties; Range of motion (ROM)

颈前路植骨融合术 (anterior cervical discectomy and fusion, ACDF) 是治疗颈椎病最常见的方法, 具有见效快、手术简单等优点, 但术后会在一定程度上加速邻近节段退变^[1]。颈椎间盘置换术 (total disc replacement, TDR) 作为代替融合术的新型治疗手段, 因能有效恢复病变椎体椎间隙高度及活动度而在临床逐步得到应用。临床随访显示, 置换术比融合术具有更大优势^[2]。但置换与融合的手术效果短期内并无显著差异, 尚需长期随访以观其效^[3]。TDR 作为融合术的改良, 其与 ACDF 的比较正成为临床医生及相关领域学者关注的热点^[4-5]。

对于 TDR 与 ACDF 的生物力学性能分析, 文献 [6-7] 中各自提出了相应的生物力学模型及试验方法, 采用力矩控制装置在相同力矩下测试颈椎术后运动及应力变化, 未能严格区分前屈 (flexion, Flex) 与后伸 (extension, Ext)、左侧弯 (left bending, LB) 与右侧弯 (right bending, RB)、左旋转 (left rotation, LR) 与右旋转 (right rotation, RR), 故并未完全反映颈椎在 6 个独立工况下的运动情况。Daniels 等^[8]采用力矩控制方式, 测试颈椎在 Flex/Ext、LB/RB、LR/RR 正常工况及多种混合工况下 (Flex/Ext 与 LB/RB 混合、Flex/Ext 与 LR/RR 混合等) 颈椎 TDR 与 ACDF 术后运动分析, 但试验中仅测试下位椎体运动, 对于上位椎体运动趋势并未讨论。此外, 文献 [9-10] 中对置换术运动保留能力进行试验研究。目前, 国内外有关颈椎间盘置换术的离体标本研究多以力矩控制为主, 通过分析特定力矩下颈椎各节段运动来评估其术后运动恢复效果。位移控制作为另一种控制方式, 每次加载均要求标本整体达到同样运动角度, 而手术节段运动范围 (range of motion, ROM) 的变化, 必然会导致相邻节段的运动补偿, 通过术后相邻节段和手术节段 ROM 的变化推断颈椎各节段生物力学规律, 可独立研究 6 种工况。同时,

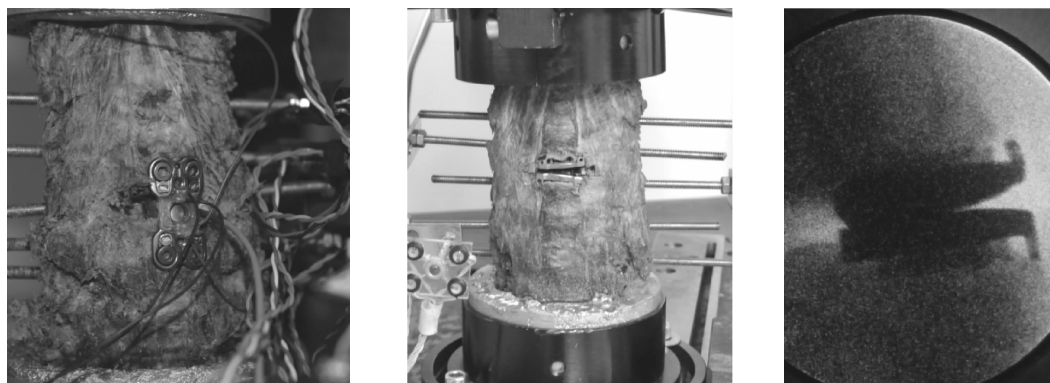
文献 [11-12] 的研究显示, 颈椎实际运动中, 头部施加于颈椎的力与颈椎实际运动轴线间存在偏心问题, 然而现有研究中采用偏心位移控制方式的离体生物力学评价文献报道极少。

本文采用人体颈椎标本, 选用偏心位移控制方式 (Flex 与 Ext 达 20°, LB、RB、LR、RR 达 15°), 利用自制夹具及材料万能试验机模拟人体颈椎在上述 6 种独立工况的运动, 通过 NDI 三维非接触式光电运动测量系统跟踪椎体运动, 最后在 Matlab 软件上分析处理数据, 得到各节段椎体运动角度、位移及力矩参数。主要分析颈椎间盘置换与融合后颈椎运动保留能力及生物力学性能, 对两种手术效果进行全面的生物力学评价, 并探讨正常颈椎生理运动特性及植入器械特点, 为颈椎间盘置换术的临床应用提供依据。

1 研究方法

1.1 标本制备

采用 12 具人体颈椎标本 (C2 ~ T1), 实验前通过前后位、侧位 X 射线扫描去除不合格标本 (对于出现椎关节强硬、椎间盘突出、椎间隙狭窄、椎骨裂隙、椎体骨折、错位、骨赘、生理曲度变直等任何一种情况的标本, 均视为不合格), 剔除周边多余肌肉、筋膜结构, 保留完整韧带组织, 于 -20 °C 条件保存。实验前 12 h 取出, 室温解冻, 采用伍德合金包埋 C2、T1 节段, C3 ~ 7 每节段固定一根与其刚性连接的金属螺杆, 螺杆上固定 4 个红外发光标记点, T1 节段与试验台固定。室温下, 由资深临床骨科医生对颈椎标本实施 C4 ~ 5 节段 TDR 或 ACDF; 其中, 人工颈椎间盘选用美国 Medtronic 公司 Prestige-LP 产品, 融合板选用美国 Depuy 公司 Slim-loc 限制型前路固定板 (见图 1)。



(a) ACDF 手术

(b) TDR 手术

(c) TDR 术后 X 光片

图1 颈椎标本术后效果

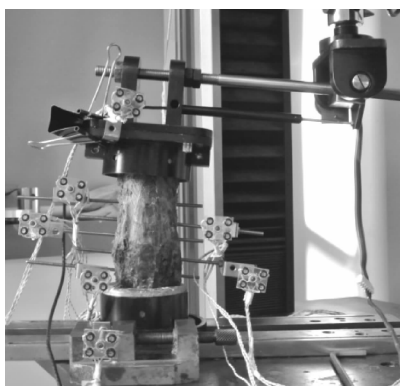
Fig.1 Cervical specimens after surgery (a) ACDF surgery, (b) TDR surgery, (c) X-ray after TDR

1.2 实验设计

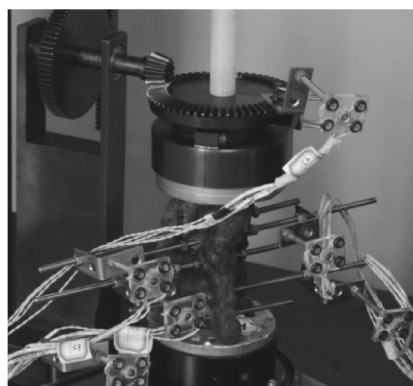
12 具标本被随机分为 2 组,对比研究 TDR 和 ACDF 的生物力学性能。实验包括:① 术前 12 具标本 C2 ~ T1 各节段原始状态 (intact) 运动性能测试;② 6 具标本实施 C4 ~ 5 节段 TDR 术后 C2 ~ T1 各节段置换态 (TDR 组) 运动性能测试;③ 6 具标本实

施 C4 ~ 5 节段 ACDF 术后 C2 ~ T1 各节段融合态 (ACDF 组) 运动性能测试。

正常人颈椎共有 Flex、Ext、LB、RB、LR、RR 6 个方向自由度,实验中全面测试以上 6 种工况,以充分模拟人体正常运动(见图 2)。



(a) Flex、Ext、LB、RB 工况



(b) LR、RR 工况

图2 试验测试示意图

Fig.2 Photos of the testing apparatus (a) Apparatus for Flex/Ext/LB/RB, (b) Apparatus for LR/RR

生物力学试验采用位移控制方式,通过对 C2 节段施加载荷来模拟颈椎运动,辅以观察颈椎所受力矩。实验数据确保所有测试对应力矩值均在 1.5 ~ 3.5 N · m 之间,当测试力矩超出预定范围时,将该组数据视为废弃值,当测试力矩大于 4.5 N · m 时,试验机自动停机。实验中,C2 节段所固定伍德合金约重 50 N,以模拟人体头部重量。同时,考虑

人体颈椎实际运动中,头部作用力与颈椎运动轴线存在偏心问题,实验设计在 Flex、Ext、LB、RB 4 种工况时,施加载荷与标本间给以 20 cm 偏心距,以模拟人体头部在上述 4 种工况运动中存在的偏心。正式记录前,对颈椎每个工况进行 60 个周期的预热运动,实验中定期向标本喷洒 0.9% 生理盐水以防脱水。

1.3 生物力学测试系统

实验采用深圳清华大学研究院植入器械重点实验室研制的三维非接触式光电测量系统,记录颈椎各节段运动参数^[13-14]。测试系统通过捕捉安装在标本各节段上的发光标记点确定各节段椎体在空间三维坐标系中的运动轨迹。

实验中,在美国 MTS 公司的万能材料试验机 CMT6104 上,通过特制夹具实现对人体颈椎正常生理运动时 6 种独立工况的模拟,该系统同时配备角度传感器、位移传感器及压力传感器。由加拿大 NDI 公司的 Optotrak Certus™ 三维非接触式光电运动跟踪系统对安装在标本各节段的 4 个发光标记点进行捕捉,确定单节椎体运动轨迹。最后,采用基于 USB6211 数据采集卡的传感器数据采集系统,对角度和位移等传感器数据进行快速采集和显示。

1.4 数据处理

选所有颈椎标本在相同运动工况下所达到最大共同运动角度时的数据作为对比标准,并依此进行数据统计分析。本研究中,选取 Flex、Ext 总角度 20°(C2 相对于 T1)以及 LB、RB、LR、RR 总角度 15°(C2 相对于 T1)时的运动数据进行分析。用各节段运动角度占颈椎标本总运动角度(C2 ~ T1)百分比数值作为评估治疗效果的参数,百分比定义方法为:

$\omega = \alpha / \theta$;其中, α 为单节椎体运动角度, θ 为 C2 ~ T1 节段运动总角度。

使用单因素方差分析法(One-way ANOVA)处理实验数据,当方差显著性水平 $P < 0.05$ 时,认为检测值具有统计学差异。

2 实验结果

图 3 所示为经 C4 ~ 5 节段 TDR 与 ACDF 术后颈椎运动恢复效果,并与术前(intact)运动效果进行比较。TDR 术后颈椎整体运动趋势接近术前状态。除 LR 工况外,其他工况中手术节段(C4 ~ 5) ROM 均有所减小,但不存在显著性差异。上、下相邻节段(C3 ~ 4、C5 ~ 6)在 TDR 术后接近原始状态,无明显变化趋势。上远相邻节段(C2 ~ 3)除 Flex 工况外,ROM 均不同程度增加,但差异不显著。下远相邻节段(C6 ~ 7、C7 ~ T1)除 RR 工况外,ROM 均有所增加。

ACDF 术后,C4 ~ 5 节段 ROM 减少,差异性显著。上、下相邻节段运动显著增加,最大增幅达 108%。上远相邻节段运动不同程度减小,除 Ext、RR 外,均存在显著性。下远相邻节段除 RB、RR 外均有所增加。

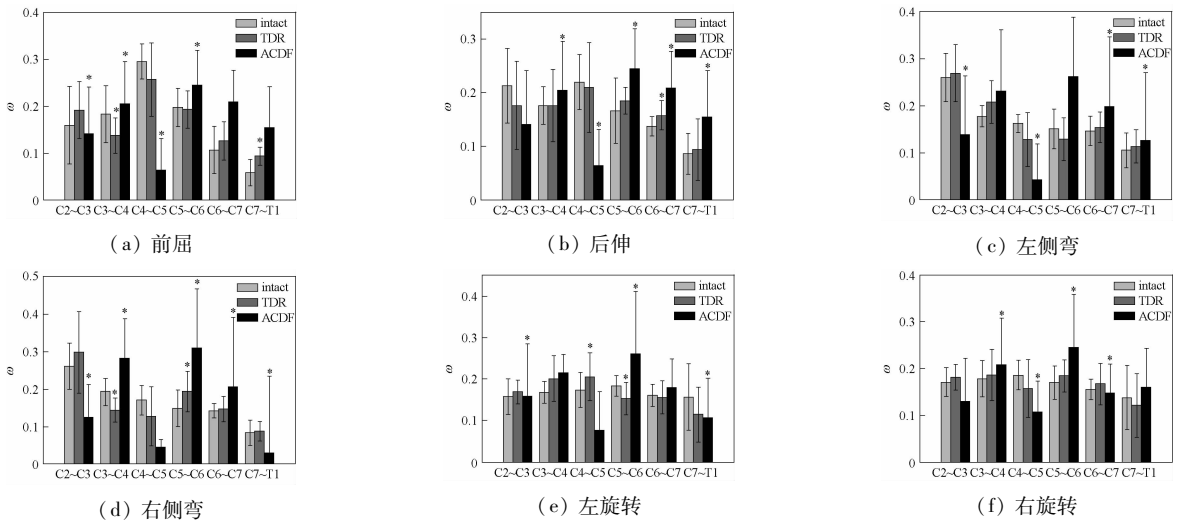


图3 TDR、ACDF 术后各节段运动度分布 (* $P < 0.05$)

Fig. 3 ROM of each segment after TDR and ACDF surgery (a) Flexion, (b) Extension, (c) Left bending, (d) Right bending, (e) Left rotation, (f) Right rotation

3 讨论

3.1 颈椎生理运动分析

定义颈椎横断面与冠状面交线为 X 轴,矢状面与冠状面交线为 Y 轴,横断面与矢状面交线为 Z 轴

轴。计算颈椎在 6 种工况绕空间三轴 X、Y、Z 的运动角度,依此分析颈椎在不同工况耦合运动规律。

3.1.1 正常颈椎生理运动分析 取原始状态下颈椎在 6 种工况绕 X、Y、Z 轴运动角度,分析正常颈椎生理运动特点(见图 4)。

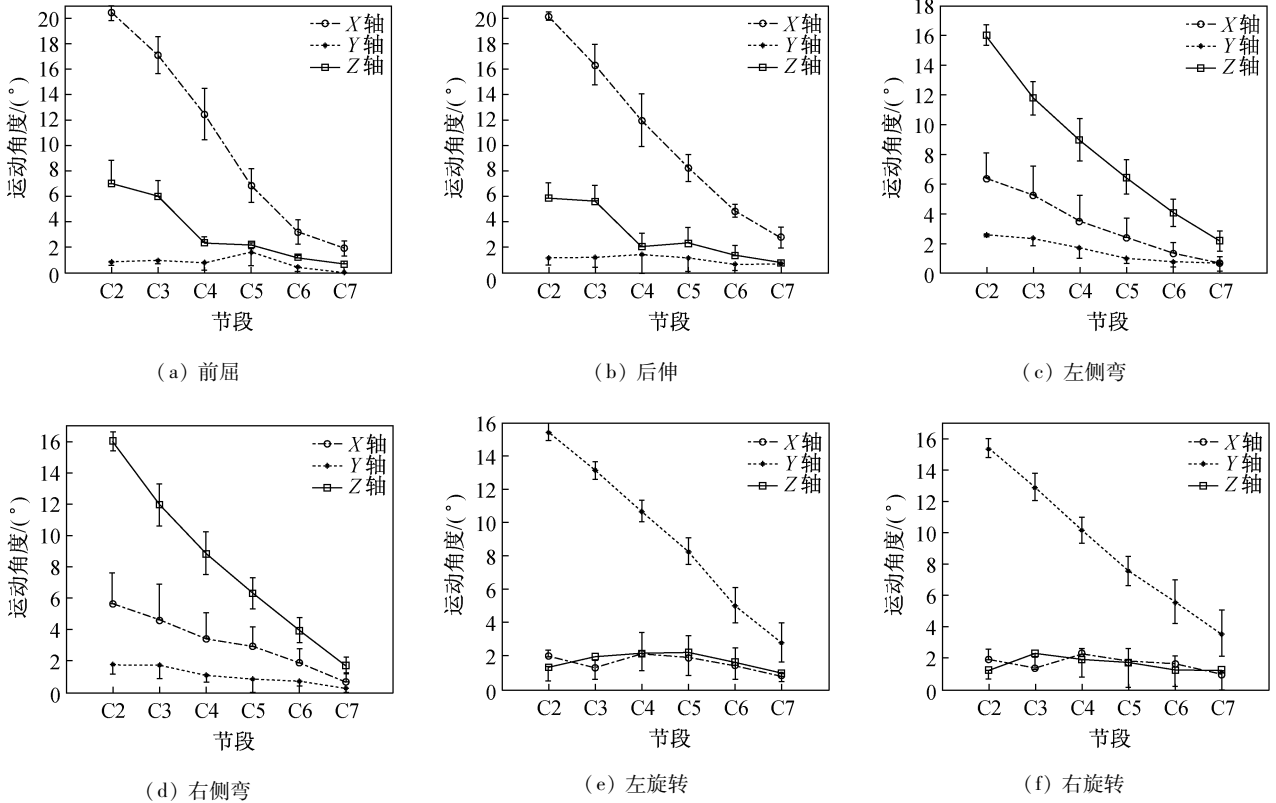


图 4 正常状态颈椎各节段绕 X、Y、Z 轴旋转角度

Fig. 4 Rotation angles of each segment around X/Y/Z axis under intact state (a) Flexion, (b) Extension, (c) Left bending, (d) Right bending, (e) Left rotation, (f) Right rotation

Flex、Ext 工况:颈椎运动主要为绕 X 轴旋转,但在 Z 轴存在一个较大的旋转分量,达总运动角度的 30%,以 C3 ~ 4 节段运动最为显著,在 Y 轴不存在明显运动分量。LB、RB 工况:颈椎运动以绕 Z 轴旋转为主,同时在 X、Y 方向分别存在达总运动角度 35% 和 12% 的旋转运动,运动曲线平滑。LR、RR 工况:颈椎旋转运动主要发生在 Y 轴,占其空间运动的绝大部分,在 X、Z 轴不存在明显运动。由以上分析可知,颈椎运动是一个复杂的三维耦合运动。侧弯工况时空间运动耦合程度最大,屈伸次之,旋转相对简单,以绕颈椎轴心运动为主。

种基本运动形式:旋转、滑动和滚动,由椎间盘及两个侧面小关节共同协调产生,是一个复杂的三关节耦合运动。离体试验研究中常将其运动分解为空间 6 种工况的独立运动,而 DeVries 等^[15]的山羊离体试验及 Nagamoto 等^[16]的临床研究均显示颈椎运动在不同工况中存在耦合现象。考虑到颈椎在不同工况的耦合效果,今后在颈椎生物力学相关研究中,可根据颈椎在空间三轴的不同耦合情况,增加混合工况的试验研究,以充分模拟人体颈椎所有可能运动,指导临床研究。

3.1.2 TDR 术后颈椎生理运动分析 取 TDR 术后颈椎绕空间三轴 X、Y、Z 运动角度,分析其运动规律

颈椎的生物力学性能比较复杂,在关节面有 3

(见图5)。TDR术后, Flex、Ext工况仍存在一个较大的绕Z轴的旋转分量, Ext工况旋转分量小于原始状态。在LB、RB工况颈椎耦合运动最为显著, 达38%, 略高于原始状态。在LR、RR工况, 耦合运动

并不明显。由此可见, 在实施C4~5节段TDR术后, 颈椎各节段耦合运动规律均能恢复至接近正常状态, 以侧弯耦合程度最大, 屈伸次之, 旋转最小。

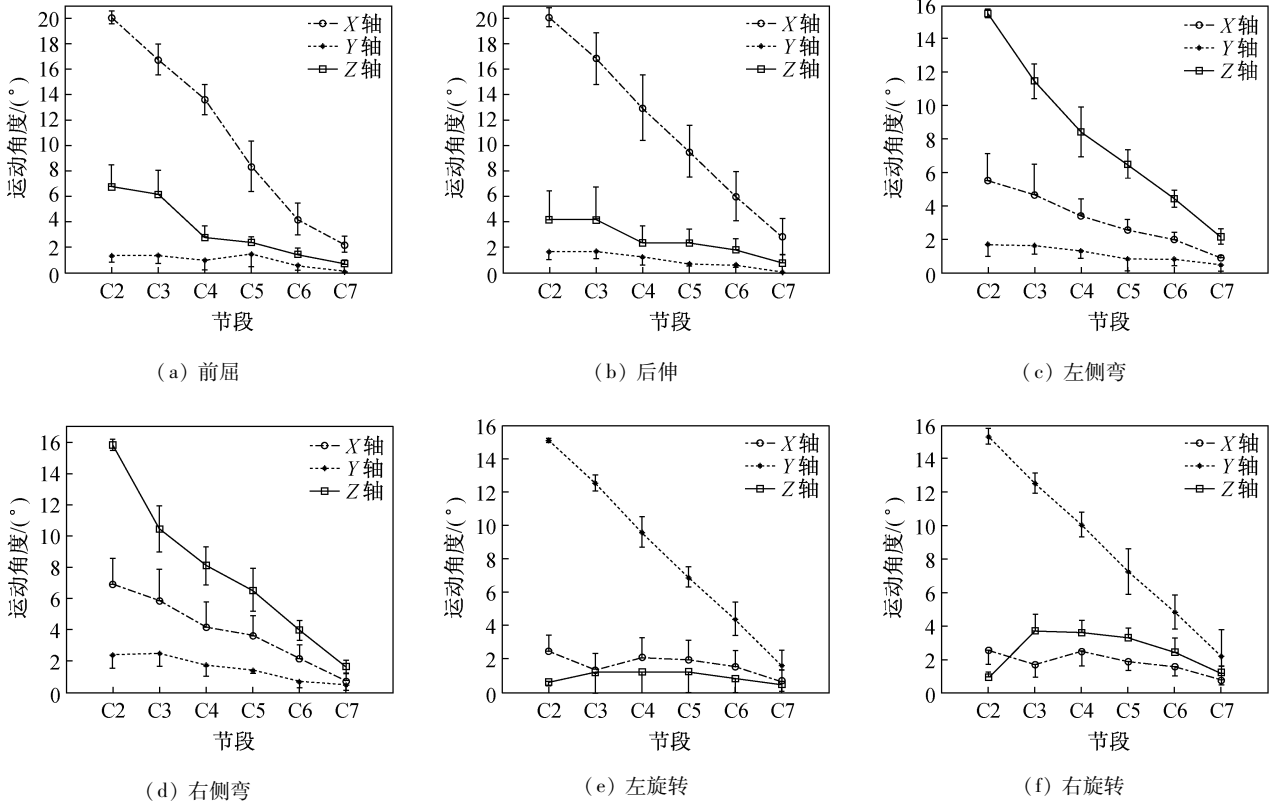


图5 TDR术后颈椎各节段绕X、Y、Z轴旋转角度

Fig. 5 Rotation angles of each segment around X/Y/Z axis after TDR surgery (a) Flexion, (b) Extension, (c) Left bending, (d) Right bending, (e) Left rotation, (f) Right rotation

3.2 ACDF与TDR术后颈椎运动比较

ACDF手术简单、见效快, 一度成为手术治疗颈椎病的“金标准”, 但其术后易导致邻近节段退变, 而制约了其发展^[17]。TDR手术思路是用人工颈椎间盘代替原有椎间盘, 保留其自然生理运动功能, 恢复正常运动趋势。

3.2.1 运动恢复功能 TDR在运动功能保留与恢复上, 较ACDF有着明显优势, 能恢复接近正常的生理运动, 且以屈伸、旋转工况恢复效果最好(见图3)。与原始状态相比, 除LR工况, TDR术后颈椎手术节段运动均有所减小, 且大都具有统计学差异, 这与Terai等^[10]的研究成果相似, 但在工况分布上存在差异。而ACDF术后手术节段运动严重丢失, 差

异显著, 这与临床观点相符, 主要是融合后由于椎体切除不再具备运动功能导致。

在相邻节段, 颈椎术后运动变化复杂。TDR术后, 上相邻节段除Flex、RB工况运动角度减少外, 其他工况均有所增加, 但规律性不明显; 下相邻节段运动在Flex、LB、LR工况减少, 在Ext、RB、RR工况增加, 无明显规律可循。TDR术后相邻节段运动变化趋势很可能与手术节段运动功能恢复情况密切相关。手术节段运动恢复较好, 则上、下相邻节段运动变化不明显; 而当手术节段运动恢复效果不理想时, 上、下相邻节段需承担较多运动, 而存在明显运动变化。ACDF术后, 上、下相邻节段运动均出现较大增幅, 这是由于手术节段运动丢失严重, 上、下相邻节

段在同样的运动强度下必须承担更多运动。

在运动远端,TDR术后上远相邻节段除Ext工况外均有所增加,下远相邻节段运动在各工况以增加为主,提示在TDR术后远端运动以补偿为主。ACDF术后,上远相邻节段运动不同程度减少,下远相邻节段运动不同程度增加,表明融合术后颈椎上远端运动减弱,下远端运动增强,显示融合后不仅手术节段、相邻节段运动趋势严重改变,远端运动也有一定影响,与正常颈椎存在较大差别。

TDR术后,颈椎能恢复接近正常的运动,且相邻节段运动变化会随手术节段运动恢复情况而调整,确保其总体运动分布接近原始状态;而ACDF术后,颈椎运动分布趋势改变较大,运动主要由相邻节段承担,这间接说明融合后易导致邻近节段退变。

3.2.2 运动补偿规律 颈椎术后手术节段及上、下相邻节段运动幅度改变趋势见表1(正值表示增幅,负值表示减幅)。TDR术后,手术节段在侧弯工况改变幅度最大(达25.20%),旋转次之,屈伸最小;上、下相邻节段最大运动改变也出现在侧弯工况。ACDF术后,手术节段在侧弯工况减幅最大(达73.41%),屈伸与旋转稍小;上、下相邻节段也以侧弯工况改变幅度最大,表明无论TDR还是ACDF,在侧弯工况均存在较大的运动补偿,这可能与前述分析侧弯工况在空间三轴运动耦合程度最大有一定关系。而在节段分布上,上、下相邻节段运动补偿趋势并无明显规律可循。

表1 TDR、ACDF术后颈椎手术节段及相邻节段运动变化幅度(D—TDR,F—ACDF)

Tab.1 Motion changes at instrumented level and adjacent levels after TDR and ACDF surgery

Level	%					
	Flex	Ext	LB	RB	LR	RR
D-34	-24.97	-0.27	10.42	-25.17	19.15	4.40
F-34	40.44	16.30	22.45	45.92	27.78	16.32
D-45	-12.82	-4.54	-19.35	-25.20	18.66	-15.08
F-45	-65.01	-70.91	-73.41	-73.02	-55.01	-41.96
D-56	-2.07	11.31	-11.38	30.17	-16.45	8.58
F-56	24.28	46.83	80.79	108.06	42.18	43.81

3.3 手术器械评价

从临床意义看,本次试验所用融合板融合效果明显,手术节段运动丧失约为术前60%,相邻节段

运动也有不同程度改变。TDR术所采用人工椎间盘为Prestige LP型产品,在Flex/Ext工况,手术节段与相邻节段运动改变幅度最小,且Ext优于Flex,旋转工况运动改变幅度较小,而在侧弯工况,运动改变幅度最大。以上结果与该款产品的机械结构特点基本吻合,在Ext工况,假体球窝关节能很好地完成在矢状面的运动;而在Flex运动时,由于球窝关节处在假体终板靠后位置,前屈角度较大时易造成上、下终板相触,而制约其运动。在侧弯工况,假体上、下终板外沿与球窝间距较大,而中国人颈椎间隙高度偏小,会导致假体在侧弯工况运动范围受限,最终造成侧弯工况手术节段运动减少。旋转工况中,假体自由度不受到任何机械结构的影响。

4 结语

本文通过离体标本实验分析C4~5节段TDR与ACDF术后颈椎运动变化规律,来比较两种手术方法的运动保留能力,同时对正常颈椎生理运动规律及两种手术器械进行探讨。

结果显示,ACDF术后手术节段运动丢失显著,最高达73.41%,TDR术能使颈椎恢复接近正常的生理运动,很大程度缓解融合所导致的手术节段运动缺失及邻近节段运动增加。两种手术中,颈椎均在侧弯工况存在最大的运动改变,TDR达45.92%,ACDF达108.06%。颈椎正常生理运动分析表明,颈椎在各工况的运动是一个空间三轴的耦合运动,并以侧弯工况耦合程度最大,绕X轴运动分量达35%,TDR术后颈椎空间三轴耦合运动规律与正常状态相近。此外,Prestige LP产品能很好地恢复颈椎在后伸、旋转工况的运动,在前屈、侧弯工况其运动保留能力稍次。

参考文献:

- [1] Burkus JK, Haid RW, Traynelis VC, et al. Long-term clinical and radiographic outcomes of cervical disc replacement with the Prestige disc: Results from a prospective randomized controlled clinical trial [J]. *J Neurosurg Spine*, 2010, 13(3): 308-318.
- [2] Coric D, Nunley PD, Guyer RD, et al. Prospective, randomized, multicenter study of cervical arthroplasty: 269 patients from the Kineflex-C artificial disc investigational de-

- vice exemption study with a minimum 2-year follow-up [J]. *J Neurosurg Spine*, 2011, 15(4): 348-358.
- [3] Kelly MP, Mok JM, Frisch RF, *et al.* Adjacent segment motion after anterior cervical discectomy and fusion versus Prodisc-C cervical total disc arthroplasty: Analysis from a randomized, controlled trial [J]. *Spine*, 2011, 36(15): 1171-1179.
- [4] Cunningham BW, Hu NB, Zorn CM, *et al.* Biomechanical comparison of single- and two-level cervical arthroplasty versus arthrodesis; Effect on adjacent-level spinal Kinematics [J]. *Spine J*, 2010, 10(4): 341-349.
- [5] 李斌, 赵文志, 陈秉智, 等. 人工椎间盘植入术后颈椎邻近节段生物力学变化的有限元分析[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(2): 94-99.
- Li B, Zhao WZ, Chen BZ, *et al.* Finite element analysis on adjacent segments for its biomechanical changes after artificial cervical disc prosthesis [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(2): 94-99.
- [6] Faizan A, Goel VK, Biyani A, *et al.* Adjacent level effects of bi level disc replacement, bi level fusion and disc replacement plus fusion in cervical spine—A finite element based study [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27(3): 226-233.
- [7] Barrey C, Campana S, Persohn S, *et al.* Cervical disc prosthesis versus arthrodesis using one-level, hybrid and two-level constructs; An in vitro investigation [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(3): 432-442.
- [8] Daniels HA, Paller DJ, Feller RJ, *et al.* Examination of cervical spine kinematics in complex, multiplanar motions after anterior cervical discectomy and fusion and total disc replacement [J]. *Int J Spine Surg*, 2012, 6(1): 190-194.
- [9] Phillips FM, Tzermiadianos MN, Voronov LI, *et al.* Effect of two-level total disc replacement on cervical spine kinematics [J]. *Spine*, 2009, 34(22): 794-799.
- [10] Terai T, Faizan A, Sairyo K, *et al.* Operated and adjacent segment motions for fusion versus cervical arthroplasty [J]. *Clin Orthop Relat Res*, 2011, 469(3): 682-687.
- [11] DiAngelo DJ, Foley KT, Vossel KA, *et al.* Anterior cervical plating reverses load transfer through multilevel strut-grafts [J]. *Spine*, 2000, 25(7): 783-795.
- [12] Foley KT, DiAngelo DJ, Rampersaud YR, *et al.* The in vitro effects of instrumentation on multilevel cervical strut-graft mechanics [J]. *Spine*, 1999, 24(22): 2366-2376.
- [13] 尚鹏, 刘伟强, Fogel GR, 等. 滑动型与限制型颈椎前路固定板的生物力学实验研究[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(3): 432-435.
- [14] 阎志进, 刘伟强, 尚鹏, 等. 颈椎内植入固定器生物力学性能测试系统的研究[J]. *北京生物医学工程*, 2007, 26(5): 521-525.
- [15] DeVries NA, Gandhi AA, Fredericks DC, *et al.* Biomechanical analysis of the intact and destabilized sheep cervical spine [J]. *Spine*, 2012, 37(16): 957-963.
- [16] Nagamoto Y, Ishii T, Sakaura H, *et al.* In vivo three-dimensional kinematics of the cervical spine during head rotation in patients with cervical spondylosis [J]. *Spine*, 2011, 36(10): 778-783.
- [17] 许耀, 陈文钧, 王以进, 等. 颈椎间盘切除前路钢板内固定术对相邻节段影响的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(1): 84-87.
- Xu Y, Chen WJ, Wang YJ, *et al.* Biomechanical evaluation of the adjacent segments after anterior cervical discectomy and plant fixation [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(1): 84-87.